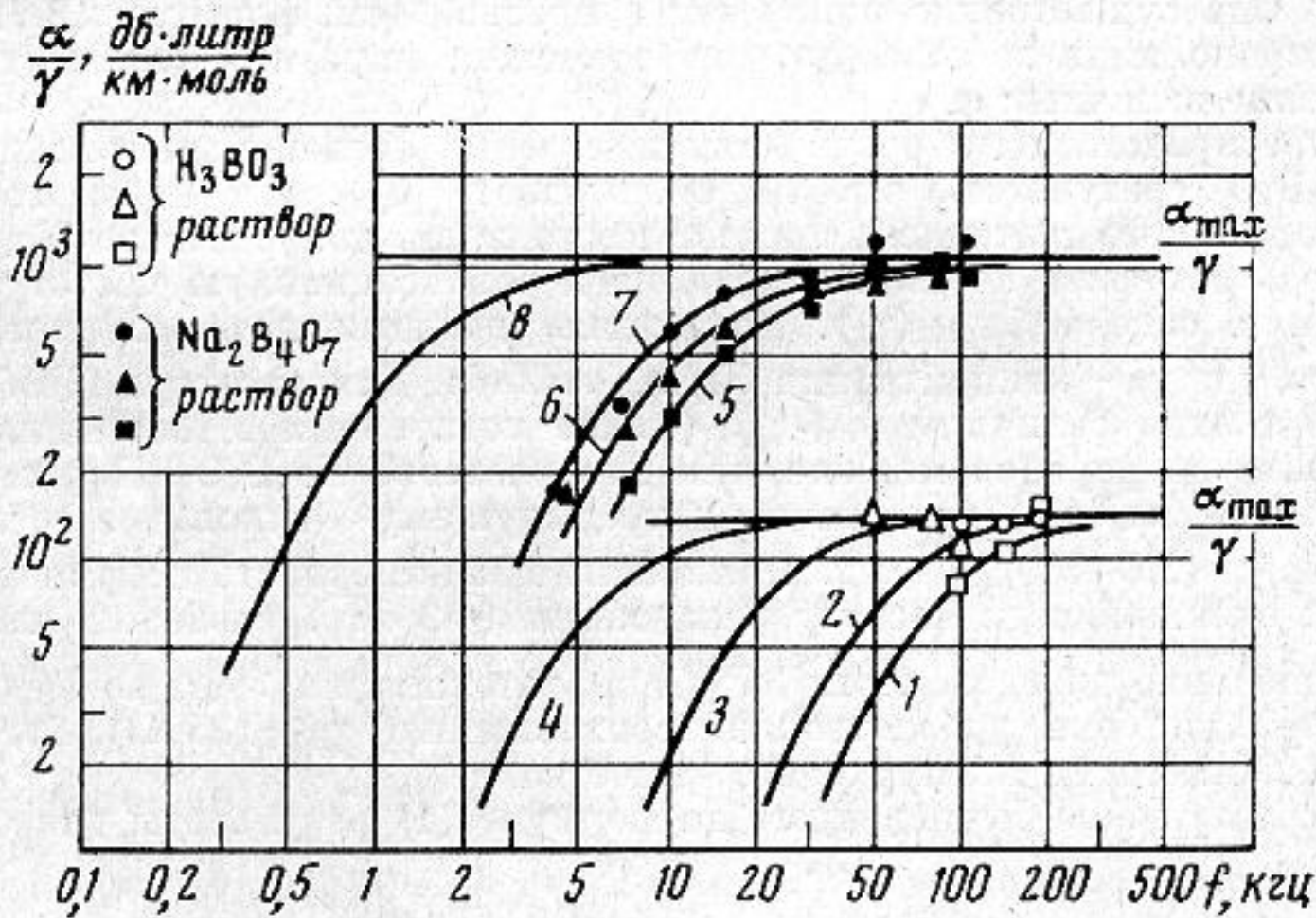


ВЛИЯНИЕ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ БЕРИЛЛИЯ И БОРА НА ОБЪЕМНУЮ ВЯЗКОСТЬ ВОДЫ И НА НИЗКОЧАСТОТНОЕ ЗАТУХАНИЕ ЗВУКА В ОКЕАНЕ

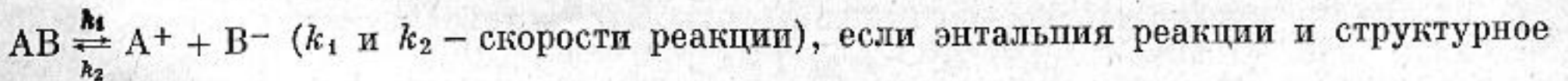
В. П. Глотов

В последнее время большой интерес представляет проблема низкочастотного затухания звуковых волн в океане ($\sim 0,1-10$ кгц). Особое внимание уделяется физической природе затухания, которая до сих пор остается невыясненной. Есть основания утверждать, что здесь, как и на высоких частотах (релаксация H_2O и $MgSO_4$), наиболее вероятен молекулярный механизм затухания (точнее, поглощения) звука в соленой океанической воде. Этот механизм четко прослеживается в экспериментальных результатах по затуханию, полученных многими авторами в глубоком океане (различные районы и гидрологические условия), где оно относительно стабильно и имеет хорошо выраженную релаксационную частотную закономерность с частотой



Кривые 1-3 и 5-7 — усредненные частотные зависимости: 1 — $\gamma_B = 0,12$ моль/л, 2 — $\gamma_B = 6 \cdot 10^{-2}$, 3 — $\gamma_B = 6 \cdot 10^{-3}$, 5 — $\gamma_B = 6 \cdot 10^{-2}$, 6 — $\gamma_B = 2,8 \cdot 10^{-2}$, 7 — $\gamma_B = 1,5 \cdot 10^{-2}$ моль/л; кривые 4, 8 — экстраполяционные значения при океанической концентрации бора $\gamma_B \approx 4 \cdot 10^{-4}$ моль/л

релаксации $f_p \approx 1-2$ кгц (Лерой, Торп и др. [1, 2]). Данные Лероя ($t \approx 13^\circ C$), в частности, дают для объемной вязкости морской воды в диапазоне килгерц величину около 30 пз, т. е. на три порядка больше объемной вязкости пресной воды и почти на два порядка больше, чем дают магниевые соли. Столь большая вязкость и аномально низкая релаксационная частота свидетельствуют о чрезвычайно эффективном физическом механизме превращения акустической энергии в тепло, действующем в морской среде. Таким механизмом может быть химическая реакция типа



изменение объема воды достаточно велики*. Эти свойства, как известно, характерны для реакций с участием микроэлементов [3]. К последним относятся микроэлементы бериллий и бор, содержащиеся в океанической воде в чрезвычайно низких концентрациях (превалирует бор, $\tilde{\gamma}_B \approx 4-5 \cdot 10^{-4}$ моль/л).

Нами была предпринята попытка количественной оценки объемной вязкости воды (как важнейшего физического признака действующего молекулярного механизма) на основе экспериментальных данных по низкочастотному поглощению звука в водных растворах $BeSO_4$ [3], H_3BO_3 и $Na_2B_4O_7$.

Измерения проводились методами «реверберационного» и «резонансного» баков на частоте 2-200 кгц [3, 4]. Концентрация сернокислого бериллия изменялась в пределах $\gamma \approx 2 \cdot 10^{-5} - 0,5$ моль/л, борной кислоты — $\gamma \approx 6 \cdot 10^{-3} - 0,12$ моль/л, тетрабората

* В реакции могут участвовать ионы растворителя (воды).

натрия — $\gamma \approx 3,8 \cdot 10^{-3} - 1,5 \cdot 10^{-2}$ моль/л. В первом случае температура раствора поддерживалась равной 20°C , в двух последних — около 12°C .

Согласно релаксационной теории (изолированный процесс), коэффициент объемной вязкости

$$(1) \quad \eta \approx 2 \cdot 10^2 \frac{\alpha_{\max}}{f_p^2} \text{ нз}$$

где α_{\max} — коэффициент низкочастотного релаксационного поглощения в диапазоне рабочих частот $f \gg f_p$ дб/км, f_p — частота релаксации, кГц. Последняя, как известно, имеет вид

$$(2) \quad f_p = \text{const} \sqrt{\gamma \varphi_A(t, S) \varphi_B(t, S)},$$

где φ_A и φ_B — коэффициенты активности релаксирующих ионов, t и S — температура и соленость раствора, γ — концентрация микроэлемента (давление не учитывается).

Легко показать, что α_{\max} не зависит от активности раствора, а зависит только от γ (в прямой пропорциональности); поэтому результаты лабораторных измерений в водных растворах можно экстраполировать на реальную океаническую среду без каких-либо поправок на соленость ($S=35\text{‰}$). Что же касается величины f_p , то в соленой воде она существенно ниже, чем в пресной (см. формулу (2)), где $\sqrt{\varphi_A \cdot \varphi_B} \approx \varphi \leq 1$, и экстраполяция на соленую воду возможна лишь при дополнительной теоретической оценке величины φ .

На фигуре представлены результаты измерения поглощения в водных растворах H_3BO_3 и $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ (результаты с BeSO_4 см. в работе [3]). Мы видим, что полная картина релаксационного поглощения имеет место лишь для раствора $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, для которого удалось измерить не только $\alpha(\gamma)$, но и релаксационную частоту (определяется по значению $\alpha(\gamma) = 0,5\alpha_{\max}(\gamma)$). Последняя удовлетворяет эмпирическому закону $f_p = 62\sqrt{\gamma_B}$ кГц, где γ_B — концентрация бора в моль/л. Для раствора H_3BO_3 удалось зафиксировать только величину $\alpha_{\max}(\gamma)$ (малое поглощение). Как видно из фигуры, $\alpha_{\max}(\gamma)/\gamma$ почти на порядок меньше, чем для раствора $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$. Полная картина поглощения имела бы вид, аналогичный предыдущему (сплошные релаксационные кривые) при $f_p \approx (270-300)\sqrt{\gamma_B}$ кГц. Последняя закономерность получается из формулы (2), если океаническую частоту релаксации (~ 2 кГц) разделить на $\varphi \approx 0,35$ (теоретическое значение для солености 35‰) и умножить на $\sqrt{\gamma_B/\tilde{\gamma}_B}$. Предельное значение концентрации бора удовлетворяет соотношению $\gamma_B \gg 0,25 K(t, S)$, где $K(t, S)$ — константа равновесия релаксирующего вещества.

Ниже представлены вычисленные по формуле (1) результаты для объемной вязкости воды:

BeSO_4 [3]	H_3BO_3	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$
20°C	12°C	12°C
24 нз	Не более 0,4 нз	53 нз

Видно, что бериллий и бор при определенных формах содержания в воде дают аномально большую вязкость, близкую по величине к наблюдаемой в океане.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Skretting, C. Leroy. Sound Attenuation between 200 hz and 10 khz, J. Acoust. Soc. America, 1970, 49, 1 (2), 276—282.
2. W. Thorp, D. Browning. Attenuation of Low Frequency Sound in the Ocean, J. Sound and Vibrat., 1973, 26, 4, 576—578.
3. В. П. Глотов. Исследование влияния некоторых микроэлементов, содержащихся в океане, на низкочастотное поглощение звуковых волн. Тр. Акуст. ин-та, 1970, вып. X, 182—199.
4. В. П. Глотов. Метод реверберационного бака для исследования поглощения звука в море. Акуст. ж., 1958, 4, 3, 239—243.

Акустический институт
Академии наук СССР

Поступила
28 октября 1974 г.